



Hoja de Datos de Tecnología de Contaminación del Aire



1. Nombre de la Tecnología: Depurador con Lecho Empacado -Torre Empacada

Este tipo de tecnología es una parte del grupo de controles para la contaminación del aire llamados colectivamente “depuradores en húmedo.” Cuando son usados para controlar gases inorgánicos, también puede llamárseles “depuradores de gases ácidos.”

2. Tipo de Tecnología: Remoción de contaminantes del aire por impacción por inercia o difusión, reacción con una pasta aguada de sorbente o reactivo, o absorción en un solvente líquido.

3. Contaminantes Aplicables:

Principalmente los humos inorgánicos, vapores, y gases (por ejemplo, ácido crómico, ácido sulfhídrico, amoníaco, cloruros, fluoruros, y SO_2); compuestos orgánicos volátiles (COV); y materia particulada (MP), incluyendo MP menor o igual a 10 micras (μm) de diámetro aerodinámico (MP_{10}), materia particulada menor o igual a $2.5 \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico ($\text{MP}_{2.5}$), y contaminantes peligrosos del aire (CPA) en forma particulada (MP_{CPA}).

La absorción es usada ampliamente como una técnica para la recuperación de materia prima y/o producto en la separación y purificación de corrientes gaseosas que contienen altas concentraciones de COV, especialmente de compuestos solubles en agua tales como metanol, etanol, iso propanol, butanol, acetona y formaldehído (Ref. *Croll Reynolds*, 1999). COV hidrófobo puede ser absorbido al usar un bloque de co-polímero disuelto en agua. Sin embargo, como una técnica de control de emisiones, es mucho más comúnmente empleada para controlar gases inorgánicos que para COV. Cuando se usa la absorción como la técnica principal para el control de vapores orgánicos, el solvente gastado debe ser fácilmente regenerado o desechado de una manera aceptable para el ambiente (Ref. *U.S. Environmental Protection Agency - EPA*, la agencia para la protección del ambiente en EE.UU., 1991). Cuando se usa para el control de MP, las concentraciones altas pueden obstruir el lecho, limitando estos dispositivos al control de corrientes con cargas de polvo relativamente bajas (Ref. *EPA*, 1998).

4. Límites de Emisión Alcanzables/Reducciones:

Gases Inorgánicos: Los vendedores de dispositivos de control estiman que las eficiencias de remoción varían del 95 al 99 por ciento (Ref. *EPA*, 1993).

COV: Las eficiencias de remoción para los absorbedores de gas varían para cada sistema de contaminante-solvente y con el tipo de absorbedor usado. La mayoría de los absorbedores tienen eficiencias de remoción por encima del 90 por ciento, y los absorbedores con torres empacadas pueden lograr eficiencias mayores del 99 por ciento para algunos sistemas de contaminante-solvente. El rango típico de eficiencia de recolección es del 70 a mayor del 99 por ciento (Ref. EPA, 1996a; EPA, 1991).

MP: Los depuradores en húmedo con lecho empacado se limitan a aplicaciones en las cuales la carga de polvo es baja, y las eficiencias de recolección varían del 50 al 95 por ciento, dependiendo de la aplicación (Ref. EPA, 1998).

5. Tipo de Fuente Aplicable: Punto (Puntual en México)

6. Aplicaciones Industriales Típicas:

La adaptabilidad de la absorción de gases como un método de control de la contaminación depende por lo general de los siguientes factores: 1) la disponibilidad del solvente adaptable;

2) la eficiencia de remoción requerida; 3) la concentración del contaminante en el vapor de entrada; 4) la capacidad requerida para el manejo de gas residual; y 5) el valor de recuperación del (de los) contaminante(s) o el costo de desechar el solvente irrecuperable (Ref. EPA, 1996). Los depuradores con lechos empacados son utilizados típicamente en la industria química, aluminio, coque, aleaciones ferrosas, alimentos, agrícola y cromado por electro-plataado. Estos depuradores han tenido un uso limitado como parte de los sistemas de desulfurar el gas (DGS) de salida, pero la proporción de flujo de la solución absorbente debe ser controlada debidamente para evitar la inundación del depurador (Ref. EPA, 1998; EPA, 1981).

Cuando se usa la absorción para el control de COV, las torres empacadas son generalmente más efectivas en costo que las torres de placas de impacción. Sin embargo, en ciertos casos, se prefiere el diseño con placas de impacción sobre las columnas con torre empacada cuando se desee el enfriamiento interno, o donde las velocidades bajas del flujo líquido humedecerían inadecuadamente el empaque (Ref. EPA, 1992).

7. Características de la Corriente de Emisión:

a. Flujo de Aire: Las proporción del flujo de gas típicas para depuradores con lecho empacado son de 0.25 a 35 metros cúbicos a condiciones estándares por segundo (m^3/s) (500 a 75,000 pies cúbicos a condiciones estándares por minuto (*scfm*)) (Ref. EPA, 1982; EPA, 1998).

b. Temperatura: La temperaturas de entrada suelen estar dentro del rango de 4 a 370 °C (40 a 100 °F) para gases residuales en los cuales la MP va a ser controlada, y para aplicaciones de absorción de gases, 4 a 38 °C (40 a 100 °F). En general,

entre mayor es la temperatura del gas, menor es la proporción de absorción, y viceversa. Las temperaturas excesivamente altas también pueden conducir a una pérdida significativa de solvente o líquido depurador por evaporación (Ref. *Avallone*, 1996; *EPA*, 1996a).

- c. **Carga de Contaminantes:** Las concentraciones típicas de contaminantes gaseosos se encuentran dentro de un rango de 250 a 10,000 partes por millón por volumen (ppmv) (Ref. *EPA*, 1996a). Los depuradores en húmedo con lecho empacado están generalmente limitados a aplicaciones en las cuales las concentraciones de MP son menores de 0.45 gramos por metro cúbico a condiciones estándares (g/m^3) (0.20 granos por pie cúbico a condiciones estándares (gr/scf)) para evitar obstrucciones (Ref. *EPA*, 1982).
- d. **Otras Consideraciones:** Para el control de CPA de vapor orgánico, típicamente se requerirán concentraciones bajas de salida, que conducirían a torres de absorción irrealizadamente altas, largos tiempos de contacto, y altas proporciones de líquido a gas que pudieran **no** ser efectivas en costo. Los depuradores en húmedo generalmente serán efectivos para el control de CPA cuando son utilizados en conjunto con otros dispositivos de control tales como incineradores o adsorbentes de carbón (Ref. *EPA*, 1991).

8. Requisitos de Pre-tratamiento de la Corriente de Emisión:

Para las aplicaciones de absorción de gases, los pre-enfriadores (por ejemplo, las cámaras de aspersión, apagadores) pueden ser necesarios para saturar la corriente de gas o para reducir la temperatura del aire de entrada a niveles aceptables para evitar la evaporación de solvente o reducidas proporciones de absorción (Ref. *EPA*, 1996a).

9. Información de Costos:

Los siguientes datos son los rangos de costo (expresados en dólares del cuarto trimestre de 1995) para los depuradores en húmedo con lechos empacados de diseño convencional bajo condiciones típicas de operación, adaptados a partir de los formatos para estimación de costos de la *EPA* (Ref. *EPA*, 1996) y referidos a la proporción del flujo volumétrico de la corriente de desecho tratada. Para el propósito de calcular el ejemplo de efectividad de costo, el contaminante utilizado es el ácido clorhídrico y el solvente es la soda cáustica acuosa. Los costos no incluyen los costos de pos-tratamiento o desecho del solvente usado o residuo. Los costos pueden ser sustancialmente más altos que en los rangos mostrados para aplicaciones que requieren materiales costosos, solventes, o métodos de tratamiento. Como regla, las unidades más pequeñas controlando un flujo residual de baja concentración serán muchísimo más costosas (por unidad de proporción de flujo volumétrico) que una unidad grande limpiando un flujo con una carga alta de contaminantes.

- a. **Costo de Capital:** \$22,500 a \$120,000 por sm^3/sec , (\$11 a \$56 por $scfm$)

- b. **Costo de Operación y Mantenimiento:** \$33,500 a 153,000 por sm^3/sec , (\$16 a \$72 por $scfm$), anualmente
- c. **Costo Anualizado:** \$36,000 a \$166,000 por sm^3/sec , (\$17 a \$78 por $scfm$), anualmente
- d. **Efectividad de Costo:** \$0.24 a \$1.09 por tonelada métrica (\$0.21 A \$0.99 por tonelada corta), costo anualizado por tonelada por año de contaminante controlado.

10. Teoría de Operación:

Los depuradores con lecho empacado consisten en una cámara que contiene capas de material de empaque de varias formas, tales como los aros *Raschig*, los aros en espiral, o las montaduras *Berl*, que proporcionan una gran superficie para el contacto entre el líquido y las partículas. El empaque es mantenido en su lugar por medio de retenedores de malla metálica y soportados por una placa cerca del fondo del depurador. El líquido depurador es introducido uniformemente por encima del embalaje y fluye hacia abajo a través del lecho. El líquido cubre el empaque y establece una película delgada. El contaminante a ser absorbido debe ser soluble en el líquido. En diseños verticales (torres empacadas), la corriente de gas fluye hacia la parte superior de la cámara (contra la corriente del líquido). Algunos lechos empacados son diseñados horizontalmente para un flujo de gas a través del empaque (a través de la corriente) (Ref. *EPA*, 1998).

La absorción física depende de las propiedades de la corriente de gas y del solvente líquido, tales como la densidad y viscosidad, tanto como de las características específicas del (de los) contaminante(s) en el gas y en la corriente de líquido (por ejemplo, la difusividad, la solubilidad en equilibrio). Estas propiedades son dependientes de la temperatura, y las temperaturas más bajas por lo general favorecen la absorción de gases por el solvente. La absorción también es mejorada por una mayor superficie de contacto, una proporción mayor de líquido a gas, y concentraciones mayores en la corriente de gas (Ref. *EPA*, 1991). La absorción química puede ser limitada por la proporción de reacción, sin embargo el paso determinante es típicamente la proporción de absorción física, no la proporción de reacción química (Ref. *EPA*, 1996a; *EPA*, 1996b).

Control de Gases Inorgánicos:

El agua es el más común los solventes usados para remover los contaminantes inorgánicos. La remoción de contaminantes puede ser mejorada manipulando químicamente la solución absorbente de manera que reaccione con el contaminante. La solución cáustica (hidróxido de sodio, NaOH) es el líquido depurador más comúnmente usado para el control de gases ácidos (por ejemplo, HCl, SO₂, o ambos), aunque el

carbonato de sodio (Na_2CO_3) y el hidróxido de calcio (cal apagada, $\text{Ca}[\text{OH}]_2$) también son utilizados. Cuando los gases ácidos son absorbidos dentro de la solución depuradora, estos reaccionan con los compuestos alcalinos para producir sales neutrales. La proporción de absorción de los gases ácidos depende de la solubilidad de los gases ácidos en el líquido depurador (Ref. EPA, 1996a; EPA, 1996b).

Control de COV:

La absorción es una operación comúnmente aplicada en los procesos químicos. Es utilizada como una técnica de recuperación de materia prima o de producto en la separación y purificación de corrientes gaseosas que contienen concentraciones altas de compuestos orgánicos (por ejemplo, en las operaciones de purificación de gas natural y recuperación de productos residuales del coque). En la absorción, los compuestos orgánicos en la corriente de gas son disueltos en un solvente líquido. El contacto entre el líquido absorbente y el gas de venteo se logra en torres de aspersion contracorriente, depuradores, o columnas compactas o con placas (Ref. EPA, 1995).

El uso de la absorción como la técnica principal de control para los vapores orgánicos está sujeto a varios factores limitativos. Un factor es la disponibilidad de un solvente apropiado. EL COV debe ser soluble en el líquido absorbente y aún entonces, por cualquier líquido absorbente dado, sólo los COV que son solubles pueden ser removidos. Algunos solventes comunes que pueden ser útiles para los compuestos orgánicos incluyen el agua, los aceites minerales, u otros aceites no volátiles de petróleo. Otro factor que afecta la adaptabilidad de la absorción para el control de emisiones orgánicas es la disponibilidad de datos sobre el equilibrio entre el vapor y el líquido para el sistema específico de compuesto orgánico y solvente de interés. Los datos son necesarios para el diseño de los sistemas de absorción; sin embargo, no están disponibles fácilmente para los compuestos orgánicos poco comunes.

El solvente seleccionado para remover el (los) contaminante(s) debe tener una alta solubilidad para el vapor o gas, baja presión de vapor, baja viscosidad, y debería ser relativamente económico. El agua es usada para absorber COV que tienen solubilidades en agua relativamente altas. *Amphyphylic* (un bloque de co-polímeros) agregado al agua puede hacer COV hidrófobo soluble en agua. Otros solventes tales como los aceites de hidrocarburo son utilizados para COV que poseen bajas solubilidades en agua, aunque sólo en industrias en donde grandes volúmenes de estos aceites se encuentran disponibles (por ejemplo, refinerías de petróleo y plantas petroquímicas) (Ref. EPA, 1996a).

Otra consideración en la aplicación de la absorción como técnica de control es el tratamiento o desecho del material removido del sistema de absorción. En la mayoría de los casos, el líquido depurador que contiene el COV es regenerado en una operación conocida como remoción, en la cual el COV es de-sorbido del líquido absorbente, típicamente a temperaturas elevadas y/o bajo vacío. Enseguida, el COV es recuperado como un líquido por medio de un condensador (Ref. EPA, 1995).

Control de MP:

En los depuradores con lecho empacado, la corriente de gas es forzada a seguir un camino en circuito a través del material de empaque, sobre el cual se impacta gran parte de la MP. El líquido sobre el material de empaque recolecta la MP y fluye descendiendo por la cámara hacia el drenaje al fondo de la torre. Un *de-mister* (eliminador de neblina) se coloca típicamente por encima/después de el empaque y la reserva de líquido depurador. Cualquier líquido depurador y MP humedecida encauzada en la corriente de gas de salida será removida por el eliminador de neblina y regresada para drenarse a través del lecho empacado.

En un depurador con lecho empacado, las concentraciones altas de MP pueden obstruir el lecho, he ahí la limitación de estos dispositivos al uso en corrientes con cargas de polvo relativamente bajas. La obstrucción es un problema serio para los depuradores con lecho empacado porque el embalaje es más difícil de alcanzar y limpiar que en otros diseños de depurador. Se encuentran disponibles los depuradores con lecho móvil que están empacados con esferas de plástico de baja densidad que son libres de moverse dentro del lecho empacado. Estos depuradores son menos susceptibles a obstruirse debido al incremento en el movimiento del material de embalaje. En general, los depuradores con lecho empacado son más apropiados para la depuración de gases que la depuración de MP debido a los altos requisitos de mantenimiento para el control de MP (Ref. EPA, 1998).

11. Ventajas/Pros:

Las ventajas de los depuradores con lechos empacados incluyen (Ref. *Air and Waste Management Association, AWMA*, la Asociación para el Manejo de Aire y Residuos,1992;):

1. Una caída de presión relativamente baja;
2. La construcción de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRF) permite su operación en atmósferas altamente corrosivas;
3. Capaz de lograr eficiencias de transferencia de masa relativamente altas;
4. La altura y/o el tipo de empaque pueden ser cambiados para mejorar la transferencia de masa sin la adquisición de equipo nuevo;
5. Un costo de capital relativamente bajo;
6. Requisitos de espacio relativamente bajos; y
7. Capacidad de recolectar tanto MP como gases.

12.. Desventajas/Contras:

Las desventajas de los depuradores con lecho empacado incluyen (Ref. *AWMA*, 1992):

1. Puede crear el problema del desecho de agua (o líquido);
2. El producto residual se recolecta en húmedo;
3. La MP puede causar la obstrucción de los lechos o placas;
4. Cuando se utiliza la construcción de PRF, es sensible a la temperatura; y
5. Costos de mantenimiento relativamente altos.

13. Otras Consideraciones:

Para la absorción de gases, el agua u otro solvente deben ser tratados para remover el contaminante capturado de la solución. El efluente de la columna puede ser reciclado hacia el sistema y utilizado de nuevo. Por lo general esto es el caso si el solvente es costoso (por ejemplo, los aceites de hidrocarburo, las soluciones cáusticas, *amphyphylic*, bloque de co-polímeros). Inicialmente, la corriente de reciclamiento puede ir a un sistema de tratamiento de residuos para remover los contaminantes o el producto de la reacción. Entonces se podrá añadir líquido depurador de compensación previo a que la corriente vuelva a entrar en la columna (Ref. *EPA*, 1996a).

Para las aplicaciones con MP, los depuradores en húmedo generan residuos en forma de una pasta aguada. Esto crea la necesidad tanto del tratamiento de aguas residuales como de la disposición de residuos sólidos. Inicialmente, una pasta aguada es tratada para separar el residuo tóxico del agua. El agua tratada puede entonces ser reutilizada o descargada. Una vez que el agua es removida, el residuo resultante estará en forma sólida o en forma de una pasta aguada. Si el residuo sólido es inerte y no tóxico, por lo general puede ser desechado en un relleno sanitario. Los residuos tóxicos tendrán procedimientos más estrictos para su disposición. En algunos casos el residuo sólido puede tener algún valor y puede ser vendido o reciclado (Ref. *EPA*, 1998).

Configurar un dispositivo de control que optimiza el control de más de un contaminante seguido suele no lograr el más alto control posible para ninguno de los contaminantes controlados por sí solos. Por esta razón, los flujos de gas de desecho que contienen contaminantes múltiples (por ejemplo, MP y SO₂, o MP y gases inorgánicos) son generalmente controlados con dispositivos de control múltiples, ocasionalmente más de un tipo de depurador en húmedo (Ref. *EC/R Inc.*, 1996).

14. Referencias:

Avallone, 1996. "Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers," edited by Eugene Avallone and Theodore Baumeister, 10th Edition, McGraw-Hill, New York, NY, 1996.

AWMA, 1992. Air & Waste Management Association, Air Pollution Engineering Manual, Van Nostrand Reinhold, New York.

Croll Reynolds, 1999. Croll Reynolds Company, Inc., web site <http://www.croll.com>, accessed May 19, 1999.

EC/R, 1996. EC/R, Inc., "Evaluation of Fine Particulate Matter Control Technology: Final Draft," prepared for U.S. EPA, Integrated Policy and Strategies Group, Durham, NC, September, 1996.

EPA, 1981. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "Control Technologies for Sulfur Oxide Emission from Stationary Sources," Second Edition, Research Triangle Park, NC, April, 1981.

EPA, 1982. U.S. EPA, Office of Research and Development, "Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources – Volume 1," EPA-450/3-81-005a, Research Triangle Park, NC, September, 1982.

EPA, 1991. U.S. EPA, Office of Research and Development, "Control Technologies for Hazardous Air Pollutants," EPA/625/6-91/014, Washington, D.C., June, 1991.

EPA, 1992. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "Control Technologies for Volatile Organic Compound Emissions from Stationary Sources," EPA 453/R-92-018, Research Triangle Park, NC, December, 1992

EPA, 1993. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "Chromium Emissions from Chromium Electroplating and Chromic Acid Anodizing Operations – Background Information for Proposed Standards," EPA-453/R-93-030a, Research Triangle Park, NC, July 1993.

EPA, 1995. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "Survey of Control Technologies for Low Concentration Organic Vapor Gas Streams," EPA-456/R-95-003, Research Triangle Park, NC, May, 1995.

EPA, 1996a. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "OAQPS Control Cost Manual," Fifth Edition, EPA 453/B-96-001, Research Triangle Park, NC February, 1996.

EPA, 1996b. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "Chemical Recovery Combustion Sources at Kraft and Soda Pulp Mills," EPA-453/R-96-012, Research Triangle Park, NC, October, 1996.

EPA, 1998. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter," EPA-452/R-97-001, Research Triangle Park, NC, October, 1998.